

液体を電極とする放電現象の研究

(第二報)

液面上の放電図形に就いて

高 田 実
山 形 大 学
工 学 部 電 氣 科

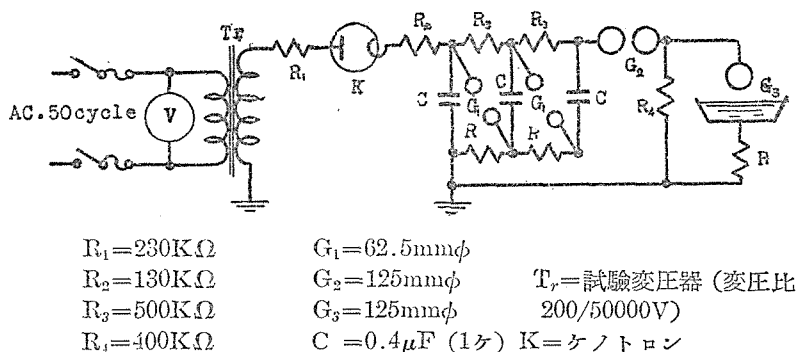
大 河 内 重 信
山 形 大 学
工 学 部 電 氣 科

松 本 喜 光
日 本 大 学
第 二 工 學 部 電 氣 科

液体を電極として衝撃波等の放電を行う場合には、金属球対金属板との間の放電（写真13,14参照）とは異なり、液体の表面に輝いた美しい放電図形が出来る。光の弱い時は肉眼でもよくその形を知り得る。又余り強い光を出すので目で認識する事が困難な場合には写真に撮影すれば図形を記録出来る。この現象に就いては前報告⁽¹⁾に極く簡単に述べたが、その後詳しく実験したので其の結果を報告する。尙本研究は昭和25年度文部省科学研究費の補助（日本大学第二工学部より申請）を得て行つたものであることを附記する。

I 実験装置及方法「第1図参照」

第 1 図 結 線 図



G_3 が試験間隙である。ここに加わる電圧は G_2 で調整した。 G_3 の上側の電極は眞鍮球(直径125mm)及縫針を使用した。下側は食塩水、硫酸銅溶液、苛性ソーダ溶液、硫酸、塩酸、水道水等の色々の濃度のものを、必要に応じて洗面器、円形或は方形水盤、硝子槽、或は特製の眞鍮製円形大皿に満して使用し、液中に銅板を入れて接地した。放電に際して液面に出来る図形は一々目で観察したが、尙全て之れを写真に撮影した。

II 実験結果

放電図形は液の種類、濃度(従つて導電率)印加電圧、波形等で種々になるが、それを分類して概略を述べると次の如くである。写真撮影数は300以上もあるのでその全部を示すことは不可能であるから、此処にはその代表的のもののみを掲げる。

(a) 球から液面迄の放電状況

球から空気間隙を通じて柱状をなし凡そ一直線に放電して液面に達するが、その周囲の瓦斯は熱して強く光り、写真では太く写っている。球の下面の数点より出たものが集まつて一直線となつて放電する様子や時には或るものが途中で止つているのが見られ。液に映つた影を見る方が空気中の放電の様子が却つて明かになるのは面白い。尙同時に2本又は

3 本放電しているのがあるが、これは殆んど極が(一)の時である。(例へば写真I,10,12, 42,64)

(b) 放電々圧と図形の大きさ

一般に云へば同種類の液に対しては電圧が高い程図形は大きい。極性による差は余り甚しくない。此の関係は第2図に示してある。

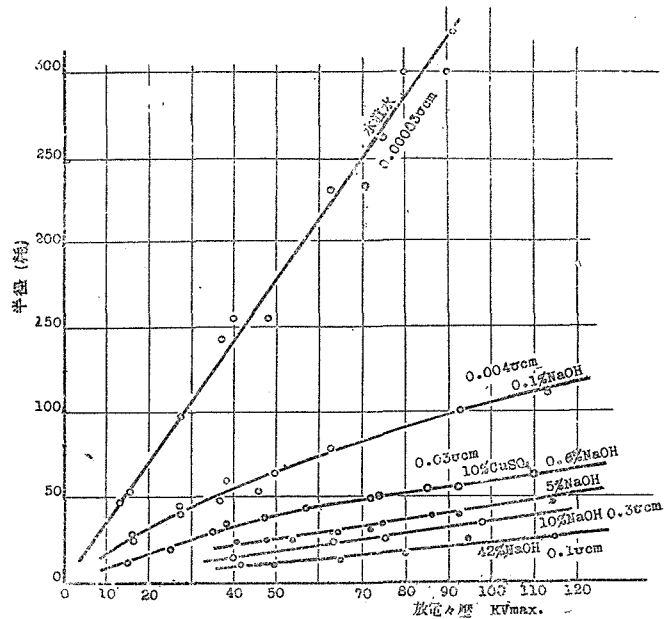
(c) 液の導電率と図形の大きさ

同一電圧では液の導電率が大きければ図形は小になる。(第三図参照)尚同一溶液で同じ導電率でも濃度の異なる場合は濃度の異なる場合よりも図形は小さい。

(d) 線の太さと導電率

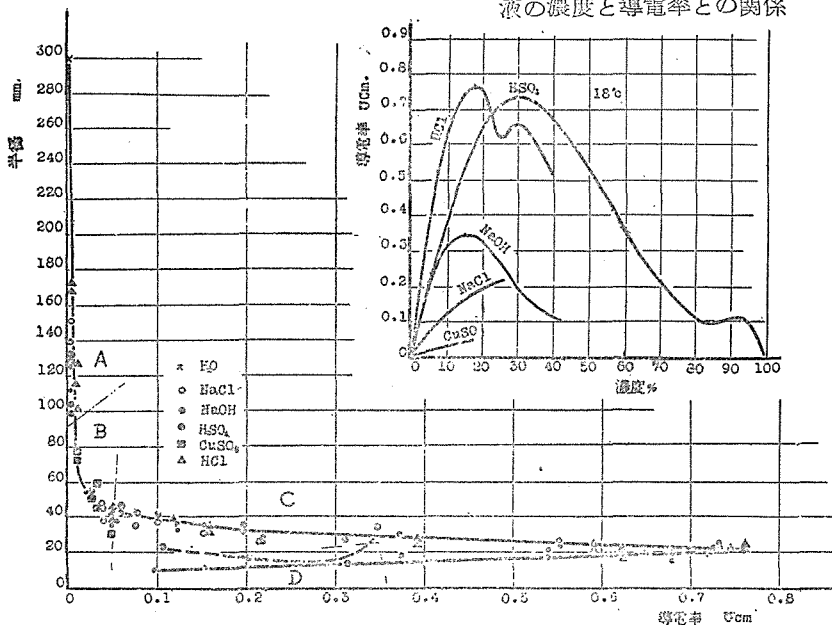
導電率が異なる時は線が太い。

(e) 図形種々の形が出来る。それを分けて見ると凡そ次の如くである。



第二図 放電図形の大きさと放電々との関係

液の濃度と導電率との関係



第三図 放電図形の大きさと溶液の導電率との関係

A=放電した所から液面上を数本の放射状線となつて進むもの更に途中から分岐し、又時としてジクザクになるものがある。(写真1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 15, 16, 24, 25, 27, 42, 43, 等)

B₁=放射状線が多く樹枝状をなすもの。(写真7, 9, 10, 17, 28, 46, 50, 56, 57)

B₂=曲つた線を描くもの(写真29, 32) その上鳥の羽根の様な形の放射状線をなすもの。(写真8, 11, 18, 47, 51, 59等)

C=雪花模様のもの。此れでは放射状基線の枝から苔の様な細毛が出てその枝が空間を埋めてしまつてゐる。(写真19, 20, 36, 37, 38, 39, 48, 49, 52, 53, 54, 55, 62, 65等)。

D=波紋を描くもの。此れでは太い基線から横に数多の細い線が出て隣りと連り遂に図形の外劃では波紋になつてゐる。(写真21, 23, 66, 67, 68, 69参照)

(f) 導電率と図形の種類

導電率小なる時(大体 $0.005\Omega\text{-cm}$ 以下)は放射状の直線であり、液が正極の時の方が少しジクザクになる。即ちA型である。半径の半分以上の中心部は強く青白く光り、それ以外の周囲部分は赤味を帯びた弱い光である。導電率が更に大($0.005\Omega\text{-cm}$ 乃至 $0.05\Omega\text{-cm}$)になると球が正極では羽毛状の太い線になるが、負極では樹枝状をなす。即ちB型に属する。導電率が $0.05\Omega\text{-cm}$ 以上になると雪花模様即C型となり、更に波紋状となる。此等の大体の關係を第3図内に示してある。

(g) 球電極の代りに縫針を使用した場合

球電極の代りに縫針を使用し、更に空気間隙をつめて針の先端を液面に僅か接せしめた場合にも、上に述べたと殆んど同じ放電図形を生ずる。このことより同じ液では電圧等が同じならば、液面上の図形は金属極の形や液面迄の距離等に関係と考へられる。針を液面に接した時には空気中の放電による光がないので液面上の図形は單獨に観測出来る。(写真26, 27, 30, 31, 32, 34, 40, 41, 44, 45, 等)

(h) 液面下の放電

硝子槽に液を入れ液面下2cmの液中に金属電極を置いて放電させ、側面から観測撮影をしたが、液面より下は全く光らない。即ち液中には放電図形は生じない。(写真33, 35)

(i) 一度液面に放電落下して後近くの導体に到る迄沿面放電する場合。液面の落下点から周囲に放電図形が出来、その先端が伸びて導線迄達した場合に沿面短絡となる。此の場合多くは波形は一方にのみ片寄つて出来勝だが、沿面放電の途中の階梯がそれぞれの部分を見て判断出来る。例へば最後に波紋状になるものも始めは雪花模様であり、更にその前は背骨をなす線である等が知られる。(写真6, 22, 29, 63)

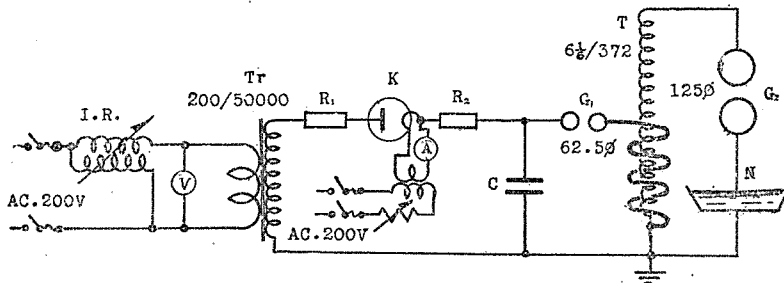
(j) 放電の線数。A型及B型に於ける放射状の線の数5本より15本の範囲で大体10本前後である。電圧及極性による相違はあまり認められない。

(k) 放電回路の抵抗の影響

第一図に見る如く G_3 に加はる電圧は G_3 で放電が起らない間は $C(=0.4\mu\text{F})$ と $R_1(=400\text{K}\Omega)$ 更にそれを連結している二、三米の電線のインダクタンスで定まる衝撃電圧である。(我々の実験室では瞬間撮影をなし得る陰極線オツシログラフがないので波形を実測する事は出来なかつた。)然し G_3 が放電をなせば衝撃波の形はその回路の抵抗で変る。これが液面上の図形に如何に影響するかが知りたかつたので、普通は液の抵抗だけであるが、(即ち $R=0$)特に硫酸銅溶液10%(導電率 $0.03\Omega\text{-cm}$)の場合 $R=10\text{K}\Omega$ の水抵抗を外に接続

して実験したが外部抵抗のない場合と差異はなかつた。(写真9,10比較)。但し何の場合でも放電回路の抵抗が全く図形に関係がないと云うのではない。

Ⅲ テスラ・コイルによる減衰振動衝撃波の表面圖形



第 四 図

T_r : 200/50000V変圧畢

K : Kenetron

V : 電圧計

A : 電流計

I.R. : 誘導電圧調整器

T : Tesla coil一次 $6\frac{1}{2}$ 二次372

G_1 : 62.5mm ϕ 球

G_2 : 125mm ϕ 球

N : 縫針

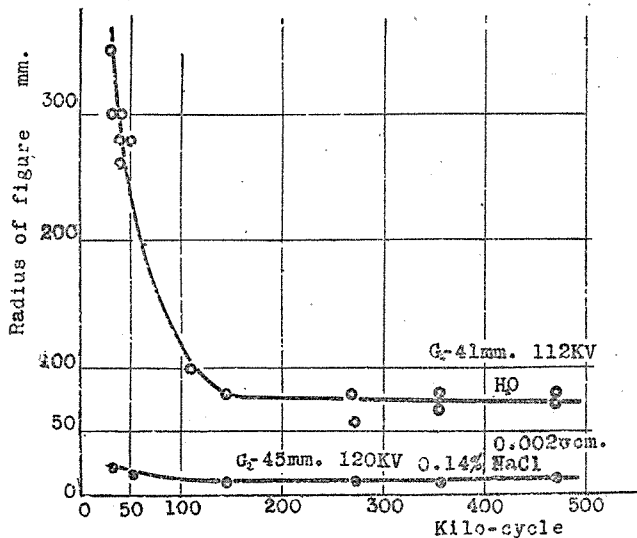
R_1 : 1.4M Ω

R_2 : 1.3M Ω

C : 蓄電器0.0025 μ F \sim 1.2 μ F

高周波高電圧を得る爲め第四図の如くテスラ・コイルを使用した。一次線輪は直径1m巻数 $6\frac{1}{6}$ 二次線輪は直径44cm 巻数372で、蓄電器を0.0025 μ Fより1.2 μ Fの範囲に変化して35kcより470kc迄の高周波振動を作ることが出来た。これを G_2 なる間隙を通じて液面上の針に放電させると衝撃波の場合と同じく液面上に放電図形が出来るが光は概して弱い。同一電圧に於ける図形

の大きさは、第5図に示す如く、周波数が高くなればなる程小さくなる。蒸溜水、水道の水及0.07%のNaCl(導電率0.001 Ω cm)の場合は前述のA型でその本数は4乃至6本であるが、これより導電率が大になると図形は線が太くなり前述のB型に近くなる。但今の場合は何れも線に分岐屈曲が多く地図の上の河川の様な形である。



第5図 周波数と図形の大きさ

Ⅵ 図形を生ずる理由とその示す意義

かくの如き種々の液面放電図形の一々に就いて完全に説明を与えるのには吾々の知識は

未だ甚だ不充分である。従来写真乾板上に於て得られたリヒテンベルヒ・フィグニア又はダスト・フィグニアに付いては沢山の実験結果や其の現象の説明があり、其等は今の吾々の実験にも有益な指示を与へて呉れる。然し我々が此處で撮影したものは時に仮にリヒテンベルヒ・フィグニアと呼んだが、これは一種の Gleit-funken で普通に写真乾板上に示される像よりは幾層倍も強い光を出している。それは兎に角只極めて抽象的にかくの如き図形を生ずる理由とその示す意義を述べると次の如きである。蓄電器 C に蓄えられた電気勢力が G_2 間隙の絶縁破壊によつて G_3 の対液面球形電極に高い電圧が印加され、最も電位傾度の高い所即ち球の正面の空気絶縁が破れて、其の直下の液面に放電する。かくて柱狀の導電性空気部分が出来ると、その後はこれが空気であろうと又細い針であろうとその作用は同じである。此の針の先が液に接触している時は普通ならば(例へば 50 \sim 交流又は直流でも又針の先端が熱して此處で弧光になることはあり得るかも知れぬが) 導電性を持つ溶液中を電流は通過すべきであるが、衝撃波の場合は此處に極めて急峻な波頭を有する電圧が加はつて來て液面に接する針の尖端部分で再び空気の絶縁破壊を起す。恐く此の時最初には普通にリヒテンベルヒ・フィグニアに就いて説明される如く(+)(-)の極性によりその附近の電子が引き付けられ或は押し出されイオンは重く速度が遅いから其處に残ると云う様な現象を起すであろう。かくて放電図形が(+)(-)異なる原因を生ずる。尤もその前 G_3 の空気の絶縁が破壊した場合、既に此處でも(+)(-)の差の出来る理由は多少ある。然し針狀電極が液面に接した場合にはそれは無い。放電々氣エネルギーは今迄の所では進行波として漸く此處迄最初の傳播をして來たのであるから主として今迄経過した途中の回路定数丈で定まり、これより先にある液の抵抗や種類には余り関係がないであろう。然しこれから先の電気勢力の傳播状況は液面に於ける空気及液体分子の状況、液の抵抗等が凡て関係する。液の抵抗が高い時は、最初絶縁破壊された部分の電位傾度は余り弱められないで矢張り同じ方向に空气中を破壊して進行する。これに反して液の抵抗が低い時は、電気勢力の一部は液面上を放電進行するも他の電気勢力部分は液体中にも侵入して行くから分割吸収更に拡散によりその勢力密度は弱くなる。液の表面では電氣的勢力は電子やイオンの運動に依つて段々と遠方に傳播して行くが、表面下の液の抵抗や電圧が深い関係を持つことは云う迄もない。尖端の高い電位傾度によつて加速された電子は高い速度で電子や分子に衝突しては分離と結合を繰り返す。放電図形はそれ等の場合の電子やイオン間の勢力が受授せられた場所を光の形で示しているのである。段々拡がつて行つても早や光を出す丈の電位傾度を持たぬ様になつた所が図形の終端となる。若し勢力が非常に強く周囲の電極に達する事あれば、沿面閃絡を生じ、力強い線が液面を走る。液の抵抗が低ければ低い程電気勢力の大部分が液中に侵入するから表面で消費される放電図形は小さくなる。

「本研究を行うに當つて米沢工業専門学校電気工学科三年生高石昭二郎君は一ケ年の長きに亘り熱心に実験助手として勤務された事に対して感謝の意を表する。尙針端を液の表面に軽く接して放電する時の図形に付いては、知友日本大学教授稲田金次郎氏と研究談交換中遇ふ同氏が過去に於て実験を行い数種の写真撮影をなされたが未発表のまま机底に藏せられているを知つた。特に附記して同氏に敬意を表する。」

文 献

1. 高田・大河内・松本, 山形大学紀要(工学)第一号 P.151

ELECTRIC DISCHARGE WITH LIQUID ELECTRODE

(Report II)

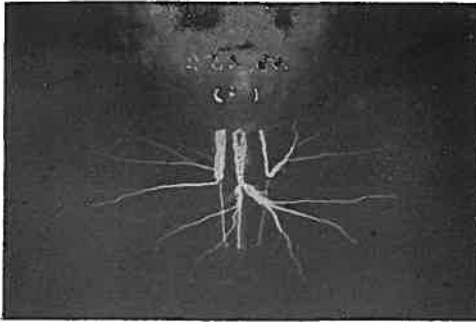
On the Discharge Figure upon the Liquid.

M. TAKADA, S. ÔKÔCHI, N. MATSUMOTO

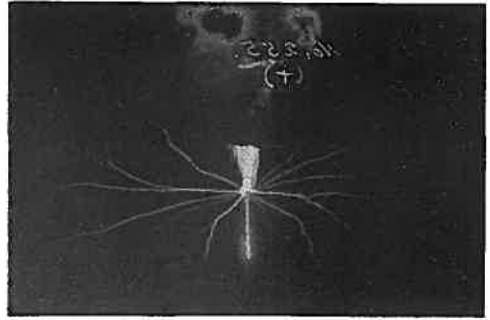
Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering

When the electric discharge by the high voltage impulse strikes the surface of the liquid electrode, there appears a brilliant figure, so called Lichtenberg Figure. This report contains such figures taken in photogram for many kinds of liquid and various concentration. Their sizes and forms are investigated, relating to impressed voltages, conductivity and kinds of the liquid etc. Also figures for the high voltage and high frequency electric wave are studied.

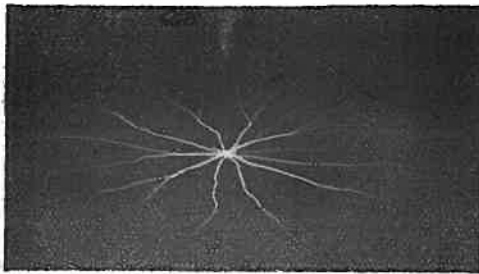
$CuSO_4$ (硫酸銅溶液)



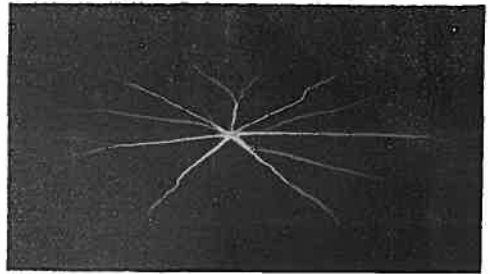
第1図 (No. 254) 球負 0.46% 半径 129m.m.
($V_1=130V$) 98K.V. 0.002 μ cm



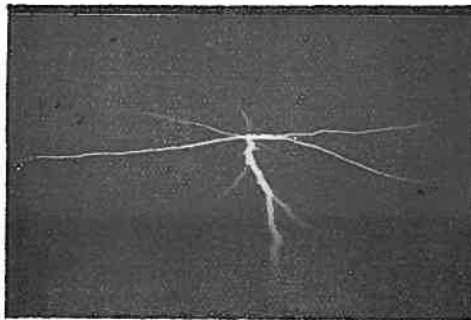
第2図 (No. 255) 球正 0.46% 半径 133m.m.
($V_1=151V$) 114K.V. 0.002 μ cm



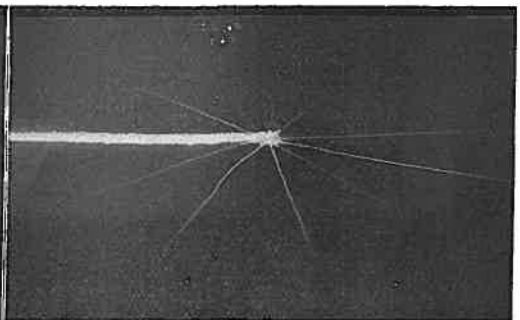
第3図 (No. 253) 針負 0.46% 半径 148m.m.
($V_1=130V$) 98KV 0.002 μ cm



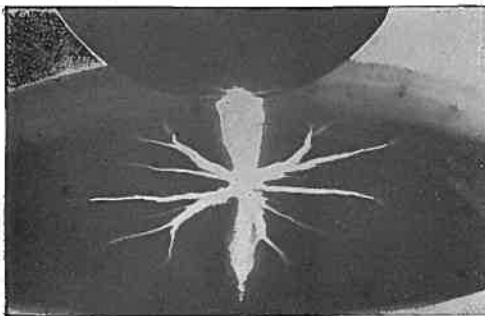
第4図 (No. 252) 針正 0.46% 半径 170m.m.
($V_1=151V$) 114KV 0.002 μ cm



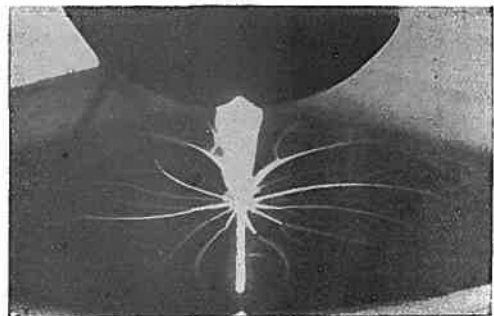
第5図 (No. 250) 針負 2% 半径 149m.m.
($V_1=130V$) 98KV 0.009 μ cm



第6図 (No. 251) 針正 2% 半径 190m.m.位
($V_1=153V$) 116K.V. 0.009 μ cm



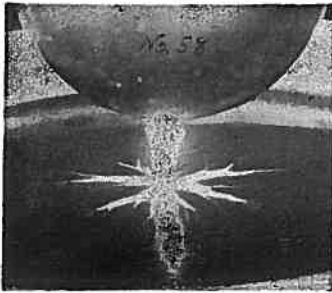
第7図 (No. 3) 球負 2.5% 半径 70m.m.
($V_1=126V$) 92K.V. 0.01 μ cm



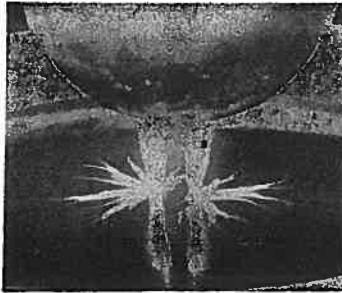
第8図 (No. 5) 球正 2.5% 半径 75m.m.
($V_1=139V$) 106K.V. 0.01 μ cm



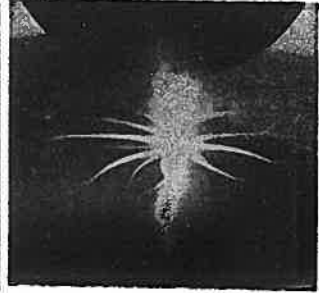
B 型



第9圖 (No. 58) 球負 10%
半径 51m.m. ($V_1=122V$)
92K.V 0.03 μ cm

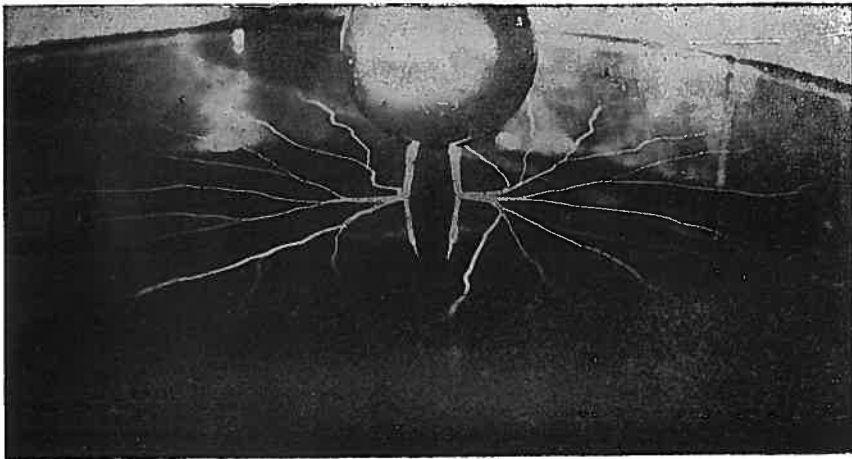


第10圖 (No. 57) 球負 10%
半径 46m.m. ($V_1=122V$)
93K.V. 0.03 μ cm $R=50\Omega$



第11圖 (No. 49) 球正 10%
半径 60m.m ($V_1=145V$)
110KV 0.03 μ cm

水
 H_2O



第12圖 (No. 21)
球負 半径 300m.m A型
0.00003 μ cm
($V_1=120V$) 92K.V

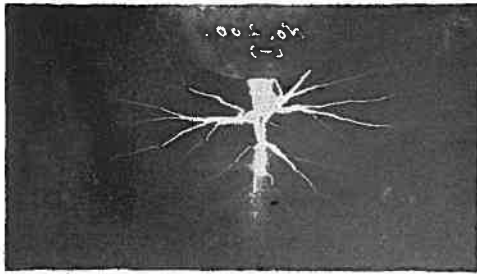
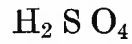
銅 板



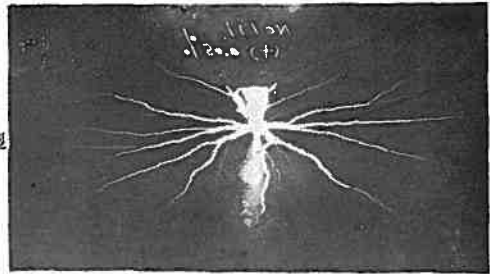
第13圖 (No. 56) 球負 弧光半径 約13m.m
($V_1=124V$) 94K.V



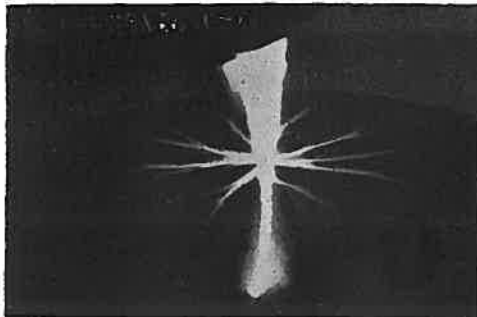
第14圖 (No. 55) 球正 弧光半径 約13m.m
($V_1=142V$) 109K.V



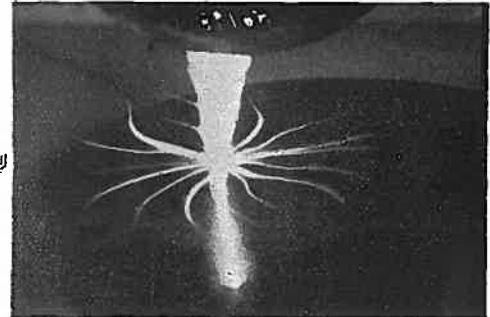
第15図 (NO. 200) 球負 0.05% 半径112m.m.
($V_1=136V$) 103K.V. 0.002 v cm



第16図 (NO. 199) 球正 0.05% 半径125m.m.
($V_1=150V$) 114K.V. 0.002 v cm



第17図 (NO. 197) 球負 0.5% 半径 50m.m.
($V_1=134V$) 101K.V. 0.05 v cm

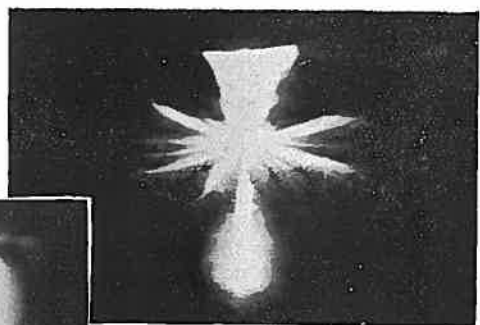
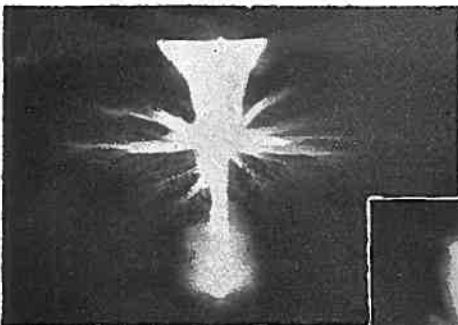


第18図 (NO. 198) 球正 0.5% 半径55m.m.
($V_1=153V$) 116K.V. 0.02 v cm

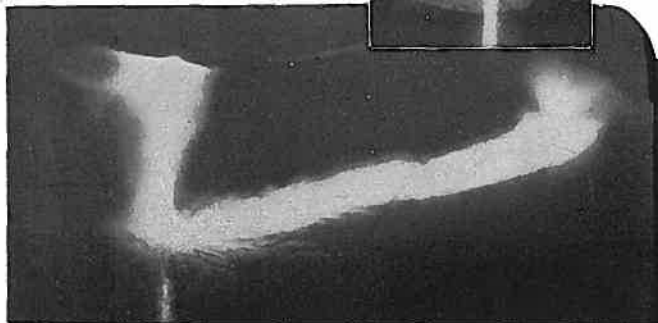
第19図 (NO. 196) 球負 3% 半径 35m.m.
($V_1=135V$) 102K.V. 0.12 v cm

C型

第20図 (NO. 195) 球正 3% 半径 33m.m.
($V_1=151V$) 114K.V. 0.12 v cm



第21図 (NO.171)
球負75%半径11m.m
($V_1=128V$) 97K.V. 0.15 v cm

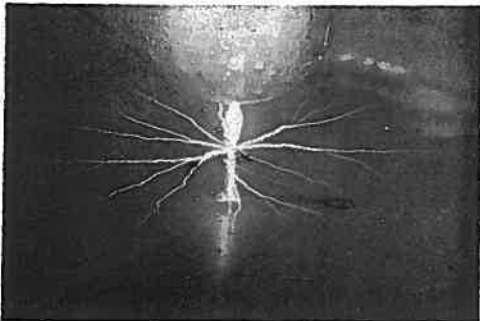


第22図 (NO. 168) 球正 92% 半径 約 23m.m.
($V_1=152V$) 115K.V. 0.1 v cm
近くの導体に沿面放電した

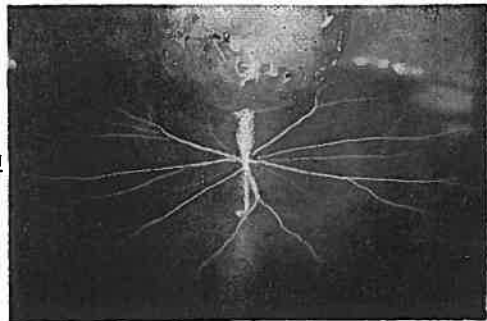


第23図 (NO. 172)
球正 75% 半径 11m.m.
($V_1=150V$) 114K.V. 0.15 v cm

HCl

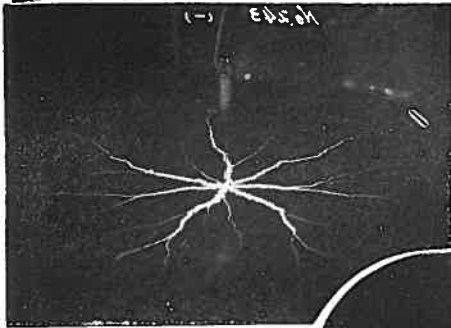


第24図 (No. 238) 球負 0.02% 半径170m.m.
($V_1=134V$) 102K.V. 0.002 μ cm

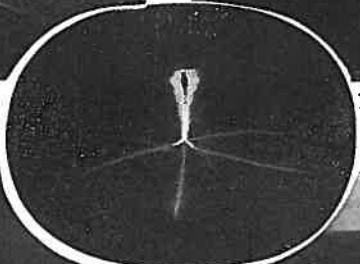
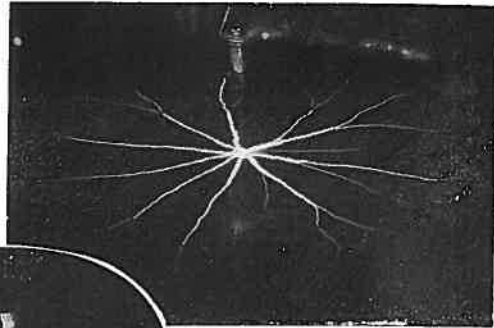


第25図 (No. 239) 球正 0.02% 半径174m.m.
($V_1=153V$) 116K.V. 0.002 μ cm

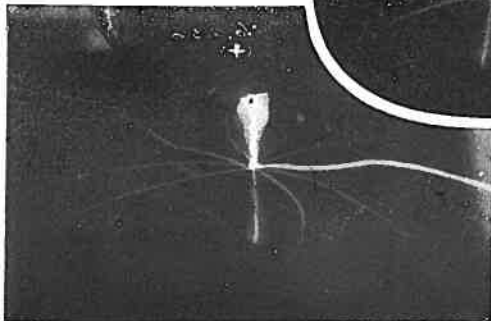
第26図 (No. 243) 針負 0.02% 半径152m.m.
($V_1=125V$) 96K.V. 0.002 μ cm



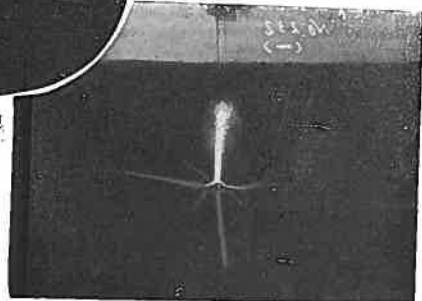
第27図 (No. 240) 針正 0.02% 半径178m.m.
($V_1=151V$) 115K.V. 0.002 μ cm



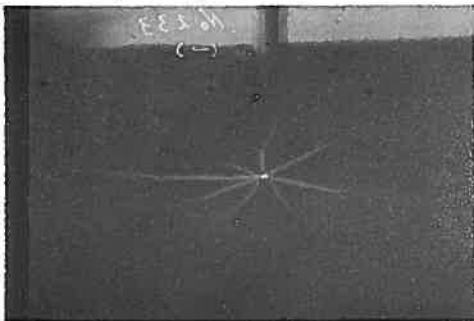
第28図 (No. 237)
球負 0.1% 半径101m.m.
($V_1=123V$) 93K.V. 0.01 μ cm



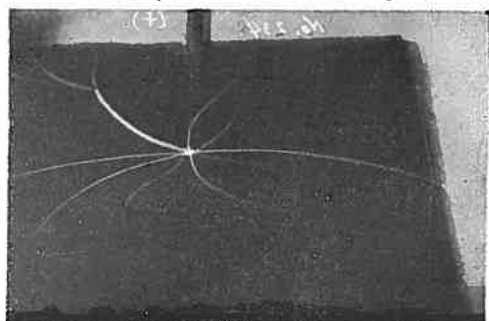
第29図 (No. 236) 0.1% 半径 116m.m.
($V_1=141V$) 107K.V. 0.01 μ cm



第30図 (No. 232) 針負 0.1% 半径101m.m.
($V_1=125V$) 96K.V. 0.01 μ cm



第31図 (No. 233) 針負 0.1% 半径 95m.m.
($V_1=123V$) 93K.V. 0.01 μ cm

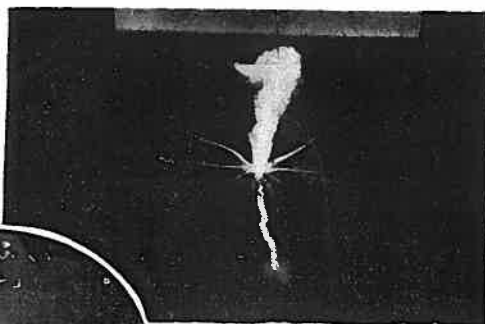


第32図 (No. 234) 針正 0.1% 半径 127m.m.
($V_1=144V$) 109K.V. 0.01 μ cm

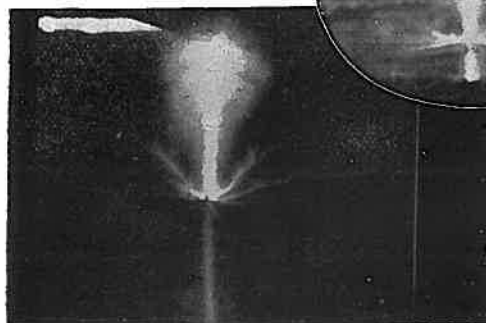
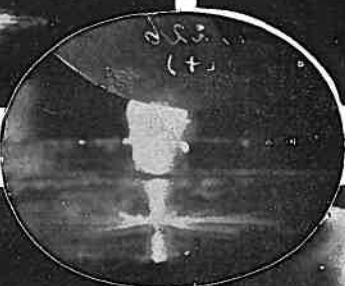
HCl



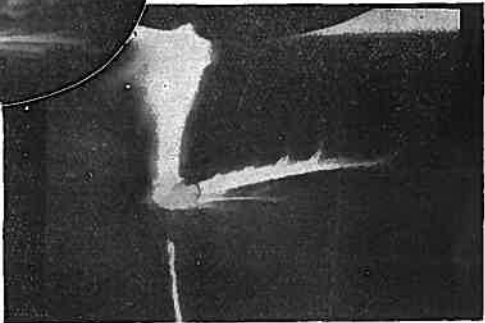
第33図 (No.227) 球負0.6%
半径38m.m. ($V_1=125$) 95K.V.
0.05 μ cm



第34図 (No.229) 針正0.6%
半径42m.m. ($V_1=149$ V)
114K.V. 0.05 μ cm



第36図 (No.162) 球負1.5%
半径39m.m. ($V_1=130$ V)
99K.V. 0.12 μ cm



第35図 (No.226) 球正0.6%
半径44m.m. ($V_1=148$ V)
113K.V. 0.05 μ cm

第37図 (No.164) 球正1%
半径55m.m. ($V_1=153$ V)
116K.V. 0.08 μ cm

電極板を球の直下に置かない場合



第38図 (No. 159) 球負2% 半径32m.m.
($V_1=128$ V) 97K.V. 0.15 μ cm



第39図 (No. 160) 球正2% 半径35m.m.
($V_1=145$ V) 110K.V. 0.15 μ cm

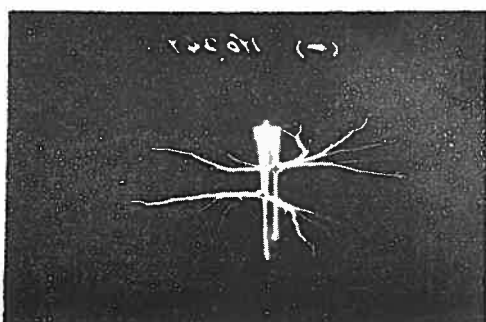


第40図 (No. 220) 針負5% 半径25m.m.
($V_1=122$ V) 93K.V. 0.40 μ cm



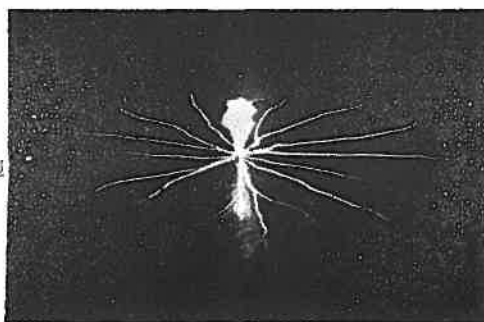
第41図 (No. 221) 針正5% 半径25m.m.
($V_1=148$ V) 113K.V. 0.40 μ cm

N_aCl

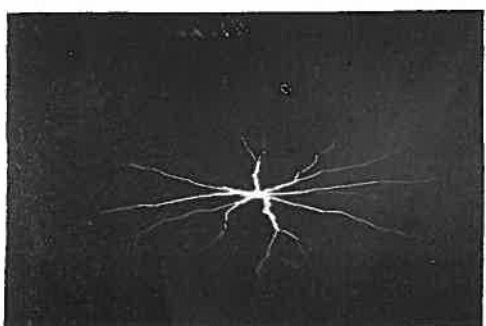


第42图 (No. 240) 球自 0.14% 半径 140m.m.
($V_1=130V$) 98K.V. 0.002 μ cm

A型

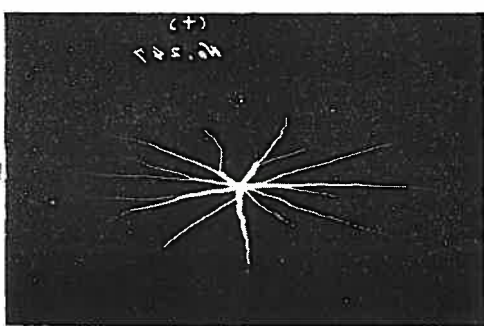


第43图 (No. 248) 球正 0.14% 半径 151m.m.
($V_1=148V$) 112K.V. 0.002 μ cm

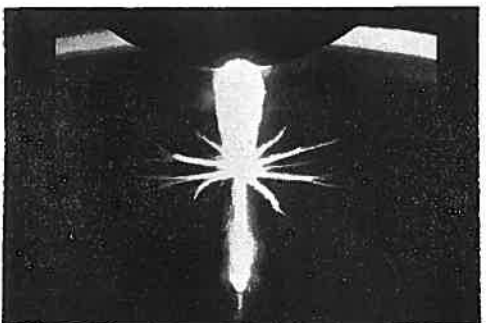


第44图 (No. 244) 針自 0.14% 半径 155m.m.
($V_1=130V$) 99K.V. 0.002 μ cm

A型

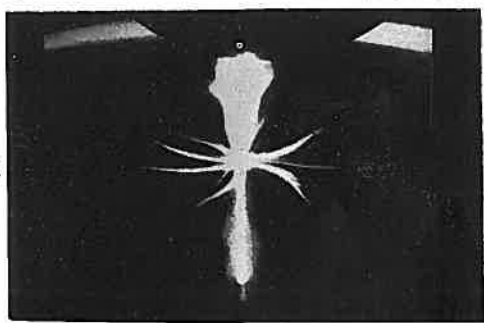


第45图 (No. 247) 針正 0.14% 半径 175m.m.
($V_1=152V$) 116K.V. 0.002 μ cm

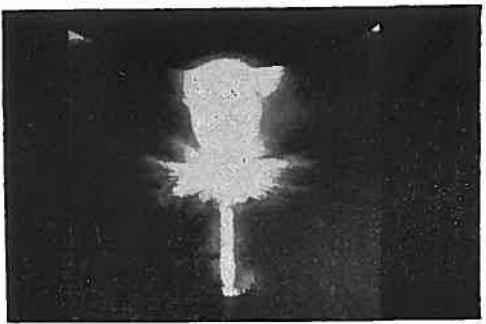


第46图 (No. 155) 球自 3% 半径 38m.m.
($V_1=130V$) 98K.V. 0.04 μ cm

B型

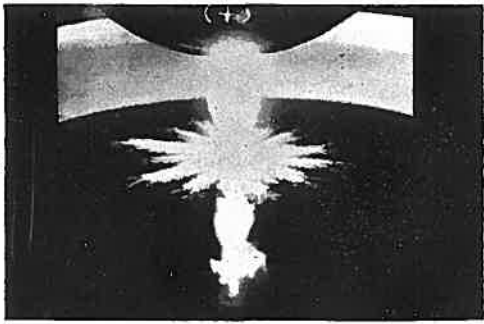


第47图 (No. 156) 球正 3% 半径 44
($V_1=143V$) 108K.V. 0.04 μ cm

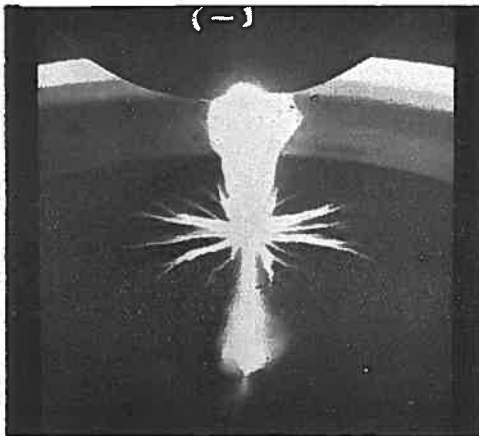


第48图 (No. 114) 球正 27% 半径 25m.m.
($V_1=140V$) 107K.V. 0.21 μ cm

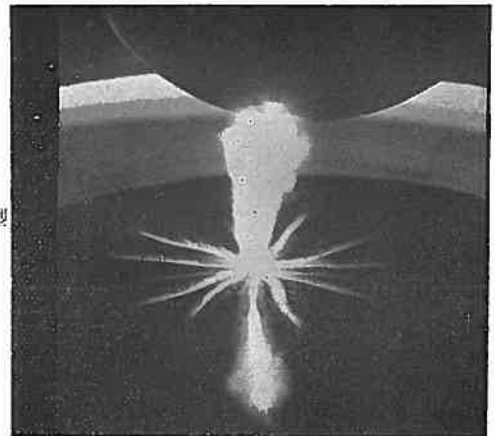
C型



第49图 (No. 148) 球正 2% 半径 41m.m.
($V_1=153V$) 116K.V. 0.08 μ cm



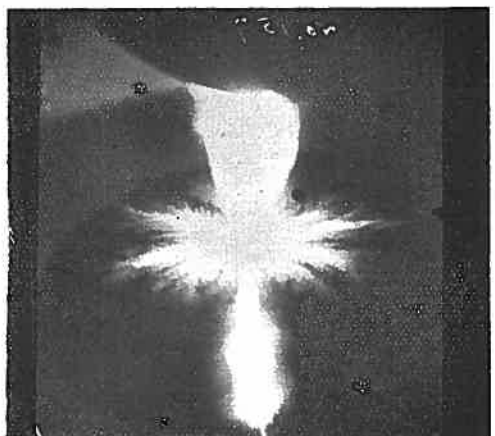
第50図 (No. 154) 球負 4% 半径 36m.m.
($V_1=130\text{V}$) 98K.V. 0.05 μcm



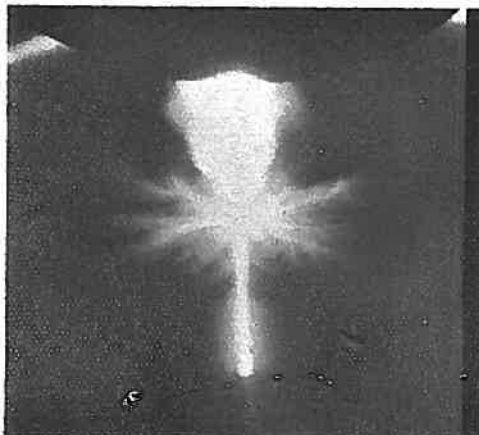
第51図 (No. 153) 球正 4% 半径 43m.m.
($V_1=145\text{V}$) 110K.V. 0.05 μcm



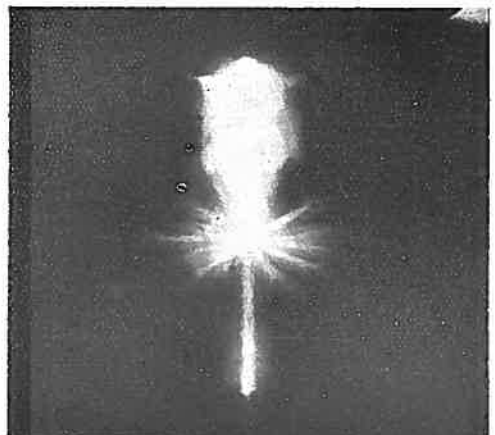
第52図 (No. 158) 球負 13.5% 半径 30m.m.
($V_1=130\text{V}$) 98K.V. 0.15 μcm



第53図 (No. 157) 球正 13.5% 半径 30m.m.
($V_1=150\text{V}$) 115K.V. 0.15 μcm

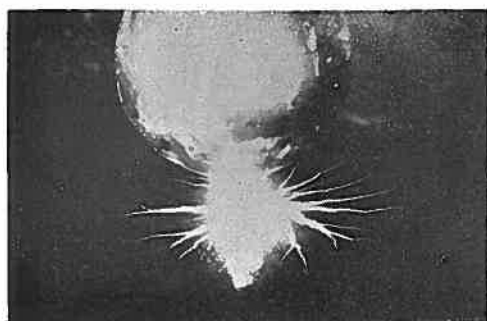


第54図 (No. 114) 球負 27% 半径 25m.m.
($V_1=125\text{V}$) 95K.V. 0.2 μcm



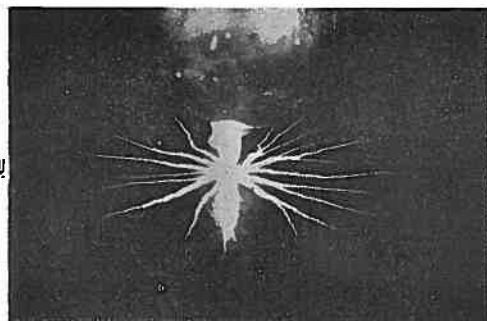
第55図 (No. 111) 球正 27% 半径 25m.m.
($V_1=140\text{V}$) 106K.V. 0.2 μcm

NaOH

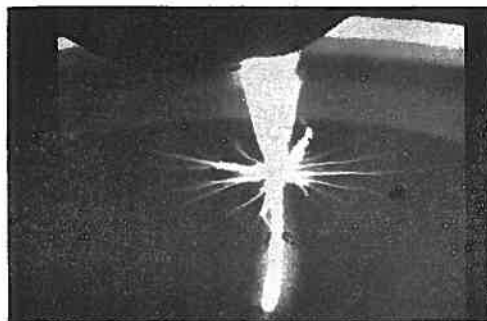


第56図 (No. 109) 球負 0.1% 半径100 m.m.
($V_1=124\text{V}$) 94K.V. 0.004 v cm

A型

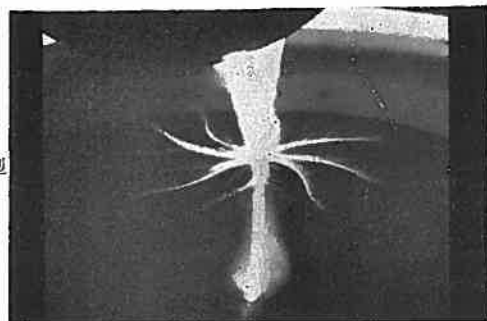


第57図 (No. 110) 球正 0.1% 半径105m.m.
($V_1=150\text{V}$) 114K.V. 0.004 v cm

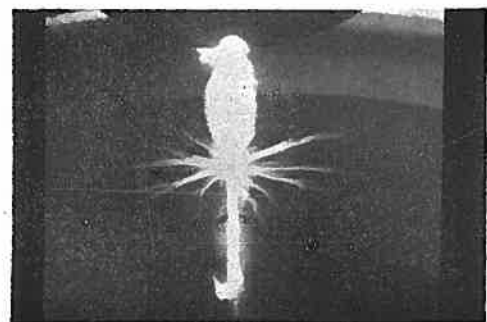


第58図 (No. 151) 球負 1% 半径 44m.m.
($V_1=130\text{V}$) 98K.V. 0.04 v cm

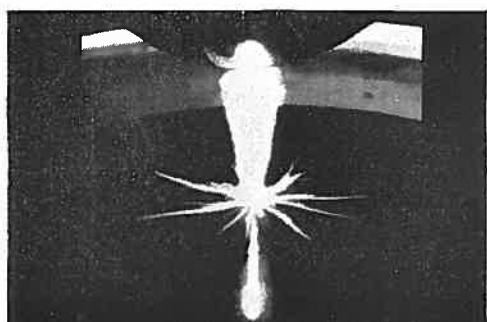
B型



第59図 (No. 152) 球正 1% 半径 46m.m.
($V_1=153\text{V}$) 116K.V. 0.04 v cm



第60図 (No. 150) 球負 1.5% 半径 42m.m.
($V_1=128\text{V}$) 97K.V. 0.06 v cm



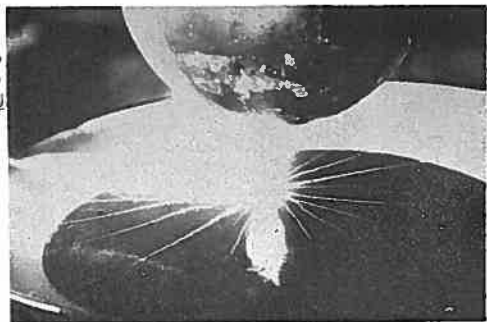
第61図 (No. 149) 球正 1.5% 半径 46m.m.
($V_1=150\text{V}$) 114K.V. 0.06 v cm



第62図 (No. 147) 球負 2% 半径 35m.m.
($V_1=128\text{V}$) 97K.V. 0.07 v cm

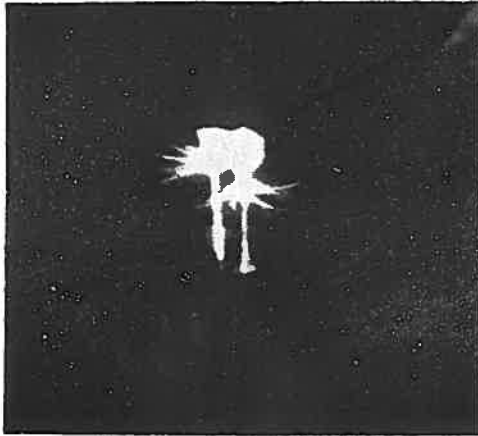
A型
→

C型
←

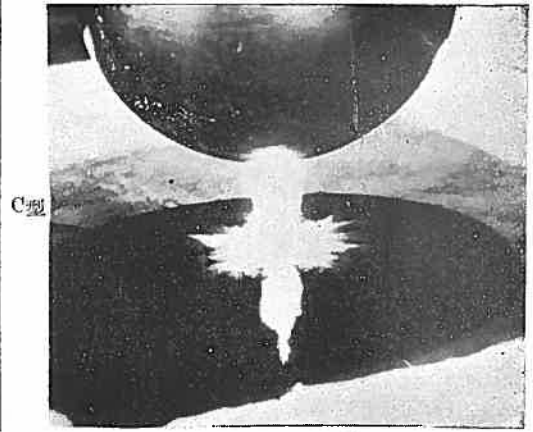


第63図 (No. 108) 球正 0.1% 半径
($V_1=146\text{V}$) 111K.V. 0.004 v cm

NaOH

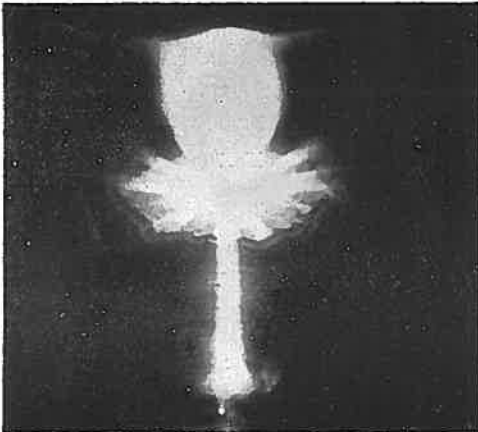


第46圖 (No. 69) 球負 5% 半徑 21m.m.
($V_1=84V$) 64K.V. 0.20 μ cm



C型

第65圖 (No. 63) 球正 5% 半徑 35m.m.
($V_1=148V$) 113K.V. 0.2 μ cm



D型

第66圖 (No. 78) 球負 15% 半徑 34m.m.
($V_1=130V$) 98K.V. 0.35 μ cm

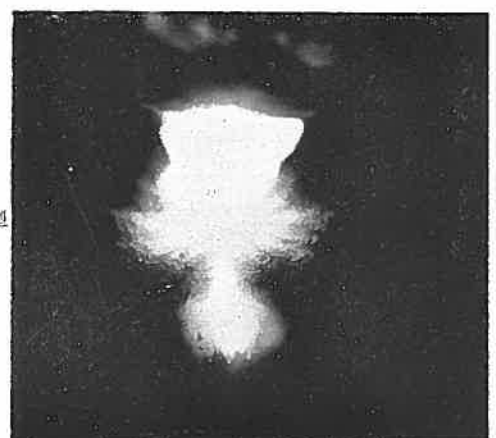


第67圖 (No. 79) 球正 15% 半徑 34m.m.
($V_1=148V$) 113K.V. 0.35 μ cm

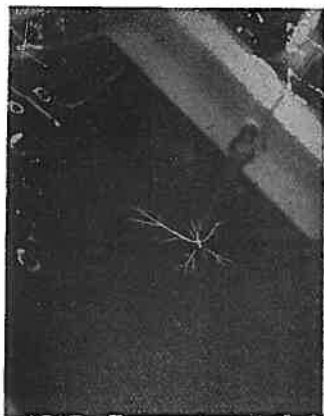


D型

第68圖 (No. 84) 球負 42% 半徑 14m.m.
($V_1=86V$) 66K.V. 0.1 μ cm



第69圖 (No. 95) 球正 42% 半徑 14m.m.
($V_1=104V$) 79K.V. 0.1 μ cm



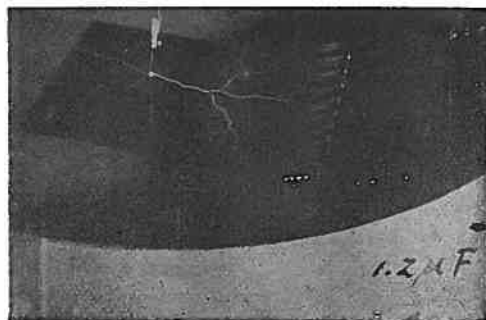
第70圖 (No. 77)
 0.035% NaCl
 0.0005 μ cm
 145K.C. 300K.V.
 半徑 35m.m.



第71圖 (No. 76)
 0.07% NaCl
 0.001 μ cm
 145K.C. 300K.V.
 半徑 23m.m.



第72圖 (No. 91) 0.035% NaCl
 0.0005 μ cm 35K.C. 190K.V.
 半徑 48m.m.



第73圖 (No. 54)
 蒸溜水 0.00001 μ cm
 33K.C. 110K.V.
 半徑 350m.m.